

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

デジタル信号処理による長距離・大容量  
光ファイバ伝送システムの周波数利用効率向上

Spectral efficiency improvement using digital signal  
processing in long-haul and high-capacity optical  
transmission systems

申請者

小林	孝行
Takayuki	KOBAYASHI

--

2019 年 10 月

携帯電話やスマートフォンなどの移動体通信サービスが普及し、ユーザーが高精細動画配信やクラウドコンピューティングなど広帯域なサービスを利用することによってギガビット級の通信を行うケースも増えおり、ネットワークトラヒックは、2019年3月現在、いまだ年率1.3倍のペースで増加を続けている。現在では、陸上から海底に至るまで世界中に張り巡らされた光ファイバ網によって実現される光通信ネットワークが情報社会を支える基盤となっている。とりわけ、基幹光トランスポートネットワークでは、増え続けるトラヒック需要を経済的に収容するため大容量化が求められる。

従来は、高速エレクトロニクスに基づいた電気時分割多重(ETDM)技術により光信号の高速化がはかられ、光ファイバ1芯に多数のチャネルを伝送可能な波長多重(WDM)技術と波長多重信号を光のまま増幅中継可能な光増幅器により光ファイバ伝送システムの大容量化・長距離化が行われてきた。さらに、デジタルコヒーレント技術の登場によって、光伝送システムの性能は飛躍的に向上した。受信端でのデジタル信号処理によって、アナログ回路では困難だった光の位相再生が安定して実現され、光の波としての性質(振幅・位相・偏波)を信号の伝送に利用可能になった。また、従来、高速光信号の伝送距離を大きく制限していた光ファイバ中の偏波モード分散および波長分散の影響を受信端でのデジタル信号処理で補償可能になっている。

光増幅器を用いた波長多重の光増幅中継伝送技術は、経済的な基幹光ネットワークを構成するうえで不可欠であり、光伝送システムの性能を飛躍的に向上させた。伝送システムの大容量化のためには、光帯域に対して多重する波長の数を増やせばよいが、低損失かつ光増幅器が存在する波長域は限られており、基幹光伝送システムで実用化されている帯域は約10 THzである。従来、光の強度のみを用いた2値の強度変調・直接検波方式による10 Gb/s、50 GHz 間隔 WDM システムでは、周波数利用効率 0.2 b/s/Hz であったが、4値の偏波多重 QPSK のデジタルコヒーレント方式を用いた 100 Gb/s、50 GHz 間隔 WDM システムでは、2 b/s/Hz まで向上している。光伝送システムの伝送容量は、周波数利用効率×光増幅帯域で決まるため、大容量化のためには、さらなる周波数利用効率の向上が必須である。周波数利用効率の向上手法には、2 種類あり光波形整形によるスペクトルの狭帯化(信号の占有帯域の削減)と信号の多値化である。従来の ETDM による高速光信号では、広帯域な電気信号を、ボーレータの 7 割～8 割程度のベッセル・トムソンフィルタに代表されるアナログのローパスフィルタやガウス型の光バンドパスフィルタによって波形整形しており、符号間干渉を許容しながら緩い帯域制限を行っていた。このような緩い帯域制限では、波長多重時に隣接チャネルとのクロストークを避けるため波長間隔を広げる必要があり、周波数利用効率が低下していた。偏波多重 QPSK を用いれば、周波数利用効率 4 b/s/Hz が理論限界であるが、同変調方式を適用した 100 Gb/s/波長の WDM 伝送システムでは、2 b/s/Hz にとどまっている。一方、信号の多値化においては、主に 2 値信号を扱う電気回路の高速化がおこなわれてきており、4 値以上の高速な電気多値信号を生成するのは困難であった。更に信号の多値度が上昇すると、同じ符号誤り率を達成するために必要な信号対雑音比(SNR)が指数関数的に上昇するため、伝送距離が短くなる。光増

幅中継伝送においては、信号が光増幅器で増幅されるごとに、自然放出光(ASE)雑音が付加され、SNR が劣化する。受信端で高い SNR を得るためには、中継間隔を短くする、もしくは低損失の光ファイバを用いるなどして光増幅器を低い利得で動作させて ASE を低減させるか、ファイバ入力パワーを上昇させればよい。増幅中継間隔が決まっている陸上系システムでは、中継間隔を短くする手法の適用は難しいが、伝送路ファイバを増幅媒体として用いる分布ラマン増幅によって見かけの伝送路損失を下げる手法がある。一方、光ファイバへの入力パワーが高くなると光ファイバ中で生じる非線形光学効果で信号が歪む。非線形光学効果は、信号光の電界によって引き起こされる 3 次の誘導分極により、光ファイバの屈折率が信号の強度に比例して変化する光カー効果であり、WDM 信号の各チャンネルの帯域内で生じる自己位相変調(SPM)と WDM チャンネル間で生じる相互位相変調(XPM)、四光波混合(FWM)に分類できる。従来の光伝送システムでは、非線形光学効果による信号歪みとファイバ入力パワーの向上による SNR 改善効果が最適となるような領域でオペレーションされている。したがって、高周波数利用効率の光信号を長距離伝送するためには、非線形光学効果に対して何らかの補償技術もしくは抑圧技術を適用し、受信端での SNR を向上させる必要がある。以上から、光伝送システムの大容量化のためには、有限の光帯域を有効活用するため、周波数利用効率を向上させることが必要である。加えて、従来システムとの増幅中継間隔および伝送距離の互換性の維持の観点から、高い周波数利用効率を持つ光信号を非線形光学効果にロバストかつ長距離伝送可能な技術が必要となる。

本研究では、光ファイバ伝送システムの長距離・大容量化に向けて、有限な光増幅可能な帯域を有効活用するため周波数利用効率を向上させ、長距離伝送可能な送受信デジタル信号処理を適用した光伝送技術の提案と実証を目的とする。

1 章では、光伝送システムの概要および光ファイバ伝送システムにおける周波数利用効率の向上と伝送距離長延化の課題について説明し、本研究の目的と論文の構成について述べる。

2 章では、光信号の周波数利用効率向上の手法として、光スペクトルを狭窄化可能な光 OFDM 方式について述べる。はじめに、光 OFDM 方式について概略を述べる。次に、光ファイバ伝送路における光 OFDM 信号のサブキャリア数に対する伝送品質依存性をシミュレーションにより明らかにし、100 Gb/s の光 OFDM 信号においては、最大 16 程度の少数サブキャリア数が最適であることを述べる。次に、16 程度の少数キャリア領域に適した光 OFDM 信号のデジタル信号処理と IQ 変調器を用いた生成方法に加えて、DAC の動作速度に律速されない、光多重技術を合わせて用いる方式について提案する。さらに、提案方式を用いた 100 Gb/s 伝送実験により光信号のスペクトル狭窄化による周波数利用効率の向上を実証する。本検討は、DAC の動作速度制限を緩和した初めての 100 Gb/s 光 OFDM 信号の伝送実験報告である。

3 章では、スペクトル狭窄化と並んで周波数利用効率の向上に必須な高次多値化による周波数利用効率向上について述べる。本章では、シングルキャリアの光多値信号の生成・受信方式について説明した後、提案する復調デジタル信号処理方式について説明する。

適応等化アルゴリズムとして教師なしの CMA-MMA(Constant modulus algorithm-Multi modulus algorithm)と判定指向の LMS(least-mean square)アルゴリズムを切り替えるとともに、適応等化の収束度に応じて、周波数オフセット補償に用いるデジタル PLL の制御に用いる誤差関数も切り替えることで、トレーニング信号などのオーバーヘッドの挿入による伝送レート上昇無しに、安定かつ高精度な復調処理を実現するものである。次に、単一波長の 160 Gb/s 偏波多重 16QAM 信号を用いて、長距離伝送が可能なことを伝送実験により実証する、さらに、69.1 Tb/s の大容量波長多重伝送システムにおいても提案アルゴリズムが適用可能なことを実証する。

4 章では、DAC の動作速度に律速されないスペクトル整形及び高次多値化を適用した SC-FDM 方式について述べる。はじめに、XPM を補償可能なデジタルパイロットトーンを具備した SC-FDM 方式の送受信機構成および送受信デジタル信号処理について説明する。次に、1 チャンネル当たり 400 Gb/s の 64QAM を用いた光 SC-FDM 信号の波長多重長距離伝送実験を通じて、デジタルパイロットトン方式の非線形補償効果について検証する。次に C 帯、L 帯全域を用いた 100 Tb/s 大容量波長多重実験により、SC-FDM 方式を用いて光信号の周波数利用効率を 9.1 b/s/Hz まで向上可能なことを実証する。

5 章～6 章では、2～4 章で提案した高周波数利用効率な光伝送方式の更なる長距離化及び大容量化のために、2 つの技術、前方励起分布ラマン増幅技術と空間分割多重技術の適用性を検討する。5 章では、前方励起分布ラマン増幅の適用性を検討する。光ファイバ伝送路の OSNR を改善する方式として、分布ラマン増幅が知られており、特に後方励起の分布ラマン増幅は、実用化もなされている。しかしながら、前方励起の分布ラマン増幅において、従来のコヒーレント光源による励起では、光ファイバを介して光源の相対強度雑音(RIN)が信号に転写される RIN トランスファーによって信号品質が著しく劣化する課題があった。本研究では、長距離化に向けて、RIN トランスファーの抑圧が期待できるインコヒーレント光源による前方ラマン増幅の高次多値信号への適用性を明らかにするため、160 Gb/s 偏波多重 16QAM 信号を用いた長距離波長多重伝送実験を実施し、その有効性を明らかにする。

6 章では、高密度空間分割多重(DSDM : Dense Spatial Division Multiplexing)技術の適用性を明らかにする。従来では、単一コアシングルモード光ファイバを伝送媒体としてきたが、その容量限界とされる 100 Tb/s 容量を超え、容量スケラブルな光伝送システムを実現するためには、DSDM の適用が有望である。本章では、DSDM 伝送システムについての概略とその課題を説明する。さらに、高周波数利用効率な伝送方式である 1 波長当たり 680 Gb/s の偏波多重 16QAM 信号を適用することで、伝送媒体として 32 コアのマルチコアファイバを採用し、C 帯のみの波長多重で、1 Pb/s 容量の光増幅中継伝送が可能なことを伝送実験により実証する。

第 7 章では、本研究の結論をまとめる。本研究で検討した DAC などのデバイスの動作速度制限を緩和可能な周波数利用効率向上技術は、基幹光伝送システムの継続的な大容量化および長距離化の進展に資するものと考ええる。

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
a. 学術原著論文	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <u>○Takayuki Kobayashi</u>, Masahito Morimoto, Haruki Ogoshi, Shigehiro Takasaka, Junji Yoshida and Yutaka Miyamoto, “2nd-order forward-pumped distributed Raman amplification employing SOA-based incoherent light source in PDM-16QAM WDM transmission system,” IEICE Communications Express, Article ID 2019XBL0012, February 26, 2019.</li> <li>2. <u>○小林 孝行</u>, 水野 隆之, 芝原 光樹, 宮本 裕, “ペタビット超容量を実現する高密度空間分割多重光伝送技術,” レーザー研究, 第 46 巻, 第 8 号, pp.448-453, 2018.</li> <li>3. <u>○Takayuki Kobayashi</u>, Akihide Sano, Akihiko Matsuura, Yutaka Miyamoto and Koichi Ishihara, “Nonlinear Tolerant Spectrally-Efficient Transmission Using PDM 64-QAM Single Carrier FDM with Digital Pilot-Tone,” Journal of Lightwave Technology, vol.30, no.24, pp.3805-3815, December 15, 2012.</li> <li>4. <u>○ Akihide Sano</u>, <u>Takayuki Kobayashi</u>, Eiji Yoshida, Yutaka Miyamoto, “Ultra-High Capacity Optical Transmission Technologies for 100Tbit/s Optical Transport Networks,” IEICE Transactions on Communications, Vol-E94.B, No.2, pp.400-408, February 6, 2011.</li> <li>5. <u>○Takayuki Kobayashi</u>, Akihide Sano, Eiichi Yamada, Eiji Yoshida and Yutaka Miyamoto, “Over 100 Gb/s Electro-Optically Multiplexed OFDM for High-Capacity Optical Transport Network,” Journal of Lightwave Technology, vol.27, no.16, pp.3714-3720, August 15, 2009.</li> <li>6. <u>○Takayuki Kobayashi</u>, Akihide Sano, Eiichi Yamada, Yutaka Miyamoto, Hidehiko Takara and Atsushi Takada, “Electro-optically multiplexed 110 Gbit/s optical OFDM signal transmission over 80 km SMF without dispersion compensation,” Electronics Letters , vol.44, no.3, pp.225-226, January 31, 2008.</li> </ol>
b. 総説	なし
c. 講演	<u>国際会議(査読のあるもの)</u> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <u>Takayuki Kobayashi</u>, Masanori Nakamura, Fukutaro Hamaoka, Munehiko Nagatani, Hitoshi Wakita, Hiroshi Yamazaki, Takeshi Umeki, Hideyuki Nosaka, and Yutaka Miyamoto, “35-Tb/s C-band Transmission over 800 km Employing 1-Tb/s PS-64QAM signals enhanced by Complex <math>8 \times 2</math> MIMO Equalizer,” in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, paper Th4B.2, 2019.</li> <li>2. <u>Takayuki Kobayashi</u>, Masahito Morimoto, Haruki Ogoshi, Shigehiro Takasaka, Junji Yoshida and Yutaka Miyamoto, “PDM-16QAM WDM Transmission with 2nd-Order Forward-Pumped Distributed Raman Amplification Utilizing Incoherent Pumping,” in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, paper Tu3F.6, 2019.</li> <li>3. <u>Takayuki Kobayashi</u>, Takeshi Umeki, Ryoichi Kasahara, Hiroshi Yamazaki, Munehiko Nagatani, Hitoshi Wakita, Hirokazu Takenouchi, and Yutaka Miyamoto, “96-Gbaud PDM-8QAM Single Channel Transmission over 9,600 km by Nonlinear Tolerance Enhancement using PPLN-based Optical Phase Conjugation,” in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2018, paper Th3E.4, 2018.</li> <li>4. <u>Takayuki Kobayashi</u>, Masanori Nakamura, Fukutaro Hamaoka, Kohki Shibahara, Takayuki Mizuno, Akihide Sano, Hiroto Kawakami, Akira Isoda, Munehiko Nagatani, Hiroshi Yamazaki, Yutaka Miyamoto, 他 11 名, “1-Pb/s (32 SDM/46 WDM/768 Gb/s)</li> </ol>

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<p>C-band Dense SDM Transmission over 205.6-km of Single-mode Heterogeneous Multi-core Fiber using 96-Gbaud PDM-16QAM Channels,” in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2017, paper Th5B.1, 2017.</p> <p>5. <u>T. Kobayashi</u>, H. Takara, A. Sano, T. Mizuno, H. Kawakami, Y. Miyamoto, K. Hiraga, Y. Abe, H. Ono, M. Wada, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Yamada, H. Masuda, and T. Morioka, “<math>2 \times 344</math> Tb/s propagation-direction interleaved transmission over 1500-km MCF enhanced by multicarrier full electric-field digital back-propagation,” in European Conference on Optical Communication (ECOC) 2013, Paper PD3.E.4, 2013.</p> <p>6. <u>T. Kobayashi</u>, A. Sano, A. Matsuura, Y. Miyamoto, and K. Ishihara, “Nonlinear tolerant long-haul WDM transmission over 1200km using 538Gb/s/ch PDM-64QAM SC-FDM signals with pilot tone,” in Optical Fiber Communication Conference (OFC)2012, paper OM2A.5, 2012.</p> <p>7. <u>T. Kobayashi</u>, A. Sano, A. Matsuura, Y. Miyamoto, and K. Ishihara, “High-Order QAM Transmission for Spectrally-efficient and High-capacity Transport,” in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2012, paper OM2A.3, 2012.</p> <p>8. <u>T. Kobayashi</u>, A. Sano, A. Matsuura, M. Yoshida, T. Sakano, H. Kubota, Y. Miyamoto, K. Ishihara, M. Mizoguchi, and M. Nagatani, “45.2Tb/s C-band WDM transmission over 240km using 538Gb/s PDM-64QAM single carrier FDM signal with digital pilot tone,” in European Conference and Exposition on Optical Communications (ECOC) 2011, paper Th.13.C.6, 2011.</p> <p>9. <u>T. Kobayashi</u>, A. Sano, A. Matsuura, T. Nakagawa, E. Yoshida, and M. Yutaka, “Ultra high capacity transmission based on high-order QAM for future optical transport networks,” in Advanced Photonics Congress 2011, paper SPMA3, 2011.</p> <p>10. <u>T. Kobayashi</u>, A. Sano, A. Matsuura, E. Yamazaki, E. Yoshida, Y. Miyamoto, T. Nakagawa, Y. Sakamaki, and T. Mizuno, “120-Gb/s PDM 64-QAM transmission over 1,280 km using multi-staged nonlinear compensation in digital coherent receiver,” in Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC) 2011, paper OThF6, 2011.</p> <p>11. <u>Takayuki Kobayashi</u>, “High-order QAM transmission for the future optical transport network beyond 100 Gb/s,” in SPIE Photonics west 2011, paper 79600K, 2011.</p> <p>12. <u>T. Kobayashi</u>, S. Yamanaka, H. Kawakami, S. Yamamoto, A. Sano, H. Kubota, A. Matsuura, E. Yamazaki, M. Ishikawa, K. Ishihara, T. Sakano, E. Yoshida, Y. Miyamoto, M. Tomizawa, and S. Matsuoka, “8-Tb/s (<math>80 \times 127</math>Gb/s) DP-QPSK L-band DWDM transmission over 457-km installed DSF links with EDFA-only amplification,” in Optoelectronics and Communications Conference (OECC) 2010, paper PD2, 2010.</p> <p>13. <u>T. Kobayashi</u>, A. Sano, H. Masuda, K. Ishihara, E. Yoshida, Y. Miyamoto, H. Yamazaki, and T. Yamada, “160-Gb/s Polarization-Multiplexed 16-QAM Long-Haul Transmission over 3,123 km Using Digital Coherent Receiver with Digital PLL Based Frequency Offset Compensator,” in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2010, paper OTuD1, 2010.</p> <p>14. <u>T. Kobayashi</u>, E. Yamazaki, E. Yamada, H. Masuda, A. Sano, E. Yoshida, Y. Miyamoto, K. Ishihara, R. Kudo, Y. Takatori, and M. Mizoguchi, “Ultra Long-Haul Transmission over 6,000 km of 100 Gb/s Serial Signal by Using Coherent</p>

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<p>Detection,” in Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC) 2009, paper OWW4, 2009.</p> <p>15. <u>T. Kobayashi</u>, A. Sano, E. Yamada, Y. Miyamoto, H. Takara and A. Takada, “Electro-optically subcarrier multiplexed 110 Gb/s OFDM signal transmission over 80 km SMF without dispersion compensation,” in Optoelectronics and Communications Conference (OECC) 2007, Paper PD1-6, 2007.</p>
d. 著書	なし
e. その他	<p><u>特許</u></p> <p>1. <u>小林 孝行</u>, 佐野 明秀, 宮本 裕 “光変調回路及び光伝送システム,” 特許第 4906103 号, 2012. 1. 20.</p> <p>2. <u>小林 孝行</u>, 佐野 明秀, 石原 浩一, 宮本 裕 “デジタルサンプル処理方法、デジタルサンプル処理装置、及びプログラム,” 特許第 5312384 号, 2013. 7. 12.</p> <p>3. <u>小林 孝行</u>, 中川 匡夫, 宮本 裕, 佐野 明秀, 高良 秀彦, 水野 隆之, “空間多重光伝送システム,” 特許第 5795669 号, 2015. 8. 21.</p> <p>他 関連主著特許 9 件</p>